



Geopolymeerien asettuminen ja kovettumisen mittaaminen

Jani Kivelä

Ohjaajat: Juho Yliniemi, Tero Luukkonen

**YMPÄRISTÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA
TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
KANDIDAATINTYÖ
HELMIKUU 2019**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma Ympäristötekniikka		Laboratorio Kuitu- ja partikkelitekniikan laboratorio	
Tekijä Kivelä Jani		Työn ohjaaja yliopistolla Yliniemi Juho, Ttk, Luukkonen Tero, Ttk	
Työn nimi Geopolymeerien asettumisajan ja kovettumisen mittaaminen			
Opintosuunta Biotuotteet	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Maaliskuu 2019	Sivumäärä 23
<p>Tiivistelmä</p> <p>Lasi- ja kivivillasta valmistetaan eristemateriaaleja rakennustarvikekäyttöön. Euroopan unionissa syntyi noin 2,3 miljoonaa tonnia mineraalivillajätettä vuonna 2010, ja suurin osa tästä päätyy kaatopaikoille koska rakennusvillan uusiokäytölle ei ole toistaiseksi keksitty järkeviä käyttökohteita. Merkittävä osa tästä tulee rakennus- ja purkujätteestä, jotka aiheuttavat terveyshaittoja ja ovat ympäristölle haitallisia.</p> <p>Tässä kokeellisessa kandidaatintyössä tutkittiin lasi- ja kivivillan soveltuvuutta geopolymeerien lähtöaineeksi. Näytteistä mitattiin niiden asettumisaikaa ja puristuslujuudet.</p> <p>Työn näytteet valmistettiin tyypillisen geopolymerisointimenetelmän mukaisesti. Aluksi valmistettiin aktivaattoriliuos jonka jälkeen esijauhettua mineraalivillaa sekoitettiin liuoksiin halutuilla mineraalivillan ja aktivaattorin suhteilla. Seoksen valmistumisen jälkeen ne valettiin muovi- ja metallimuotteihin ja laitettiin kovettumaan 40 °C:n lämpökaappiin mittauksia varten.</p> <p>Työssä havaittiin, että aktivaattoriliuoksen tyyppi vaikuttaa merkittävästi geopolymeerin asettumiseen ja lujuuden kehitykseen. Lopullinen asettumisaika lasivillageopolymeereille vaihteli 5 tunnista yli kahteen vuorokauteen ja kivivillageopolymeereille 3 – 30 tuntiin. Määritetyt lopulliset puristuslujuudet olivat pääsääntöisesti erittäin korkeita. Maksimipuristuslujuus lasivillanäytteelle on 82 MPa ja kivivillanäytteelle 77 MPa.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme Environmental Engineer		Laboratory Fibre and Particle Engineering Laboratory	
Author Kivelä Jani		Thesis Supervisor Yliniemi Juho, D.Sc. (Tech.), Luukkonen Tero, D.Sc. (Tech)	
Title of Thesis Measuring setting time and compressive strength of geopolymers			
Major Subject Bioproducts	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date March 2019	Number of Pages 23
<p>Abstract</p> <p>Glass and stone wool are used to produce insulation materials for construction materials. In European Union, 2.3 million tons of mineral wool waste was generated in 2010 and most of it is ends up in landfill. Main reason is that the utilization and reuse of mineral wool waste in post-consumer production remains very low. A significant amount of that comes from construction and demolition waste, which causes health damage and is harmful to the environment.</p> <p>In this experimental study we examined the suitability of glass and stone wool as a raw materials for geopolymers. Setting time and compressive strength were measured from the samples.</p> <p>Samples were prepared by according typical geopolymerization method. At first, activator solution was prepared, after which the pre-ground mineral wool was mixed with the solutions with desired ratios of mineral wool and activator. After mixing, they were casted into plastic and metal molds and were held at 40 °C oven for curing.</p> <p>It was detected that the type of activator solution has a significant effect on geopolymer setting time and compressive strength development. The final setting time for glass wool geopolymers ranged from 5 hours to more than two days and for stone wool geopolymers from 3 to 30 hours. The final compression strengths determined were generally very high. The maximum compression strength for a glass wool sample is 82 MPa and 77 MPa for a stone wool sample.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 KIRJALLISUUSKATSAUS	7
2.1 Geopolymeerit.....	7
2.2 Mineraalivillat ja niiden ominaisuudet.....	9
2.2.1 Lasivilla	10
2.2.2 Kivivilla	10
3 KOKEELLINEN OSA.....	11
3.1 Materiaalit ja menetelmät.....	11
3.1.1 Materiaalit.....	11
3.1.2 Näytteiden valmistus	12
3.1.3 Asettumisaika eli setting time-mittausmenetelmä	14
3.1.4 Puristuslujuusmittaus	15
3.2 TULOKSET	16
3.2.1 Asettumisaika	16
3.2.2 Puristuslujuus.....	17
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	20
5 YHTEENVETO	21
6 LÄHDELUETTELO.....	22

1 JOHDANTO

Euroopan unionissa syntyi noin 2,3 miljoonaa tonnia mineraalivillajätettä vuonna 2010, ja suurin osa tästä päätyy kaatopaikoille, koska mineraalivillajätteelle ei ole toistaiseksi keksitty laajamittaista hyötykäyttöä. Merkittävä osa mineraalivillajätteestä tulee rakennus- ja purkujätteestä, jotka voivat aiheuttaa terveyshaittoja ja olla ympäristölle haitallisia. Euroopan unionin lainsäädännössä todetaan, että vuoteen 2020 mennessä 70 % rakennus- ja purkujätteistä tulee saada uudelleenkäytettäväksi, kierrätettyä tai muuten hyödynnettyä. Mineraalivillajätteen hyödyntäminen geopolymeerien lähtöaineena voisi parantaa rakennus- ja purkujätteiden kierrätysprosenttia (Väntsi, O. and Kärki, T. 2014). Geopolymeerit ovat keraamien ja betonien kaltaista materiaalia, joilla voidaan korvata perinteisiä rakennusmateriaaleja.

Sementtiteollisuus tuottaa noin 5-7 % maailman hiilidioksidipäästöistä (Benhela et al. 2012). Betonin kasvava kysyntä teollistumisessa on johtanut siihen, että sementille pyritään etsimään vaihtoehtoisia korvikkeita ja ratkaisuja betonituotannossa, jotka tuottavat vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Geopolymeerien hiilidioksidipäästöt ovat jopa 80 % pienemmät kuin tavanomaisen sementin (Luukkonen, et al. 2018). Geopolymeerit ovat potentiaalisia korvaamaan osan sementistä rakennusmateriaaleissa niiden kemiallisen koostumuksensa ansiosta.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia lasi- ja kivivillan soveltuvuutta geopolymeerien raaka-aineeksi ja tutkia kuinka aktivaattoriliuoksen tyyppi vaikuttaa mineraalivillapohjaisten geopolymeerien asettumiseen ja lujuuden kehitykseen.

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä osiossa esitellään lyhyt kirjallisuuskatsaus geopolymeereistä ja mineraalivilloista.

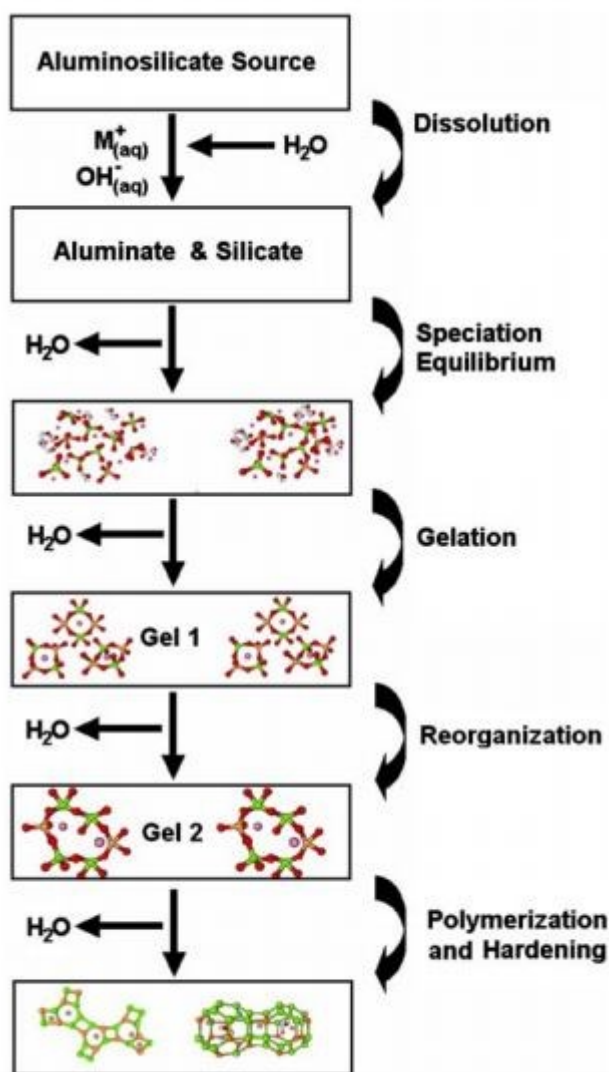
2.1 Geopolymeerit

Kiinteän alumiinisilikaatin reaktio erittäin konsentroidun alkalihydroksidin tai silikaattiliuoksen kanssa tuottaa synteettistä alkali-alumiinisilikaattimateriaalia. Tätä tuotetta kutsutaan yleisesti geopolymeeriksi, mutta alkaliaktivoituja materiaaleja voidaan kutsua myös epäorgaanisiksi geopolymeereiksi. Geopolymeerejä on tutkittu viimevuosina paljon niiden soveltuvuuden vuoksi korvaamaan osan sementistä rakennusmateriaaleissa tai tuomaan vaihtoehtoisia ratkaisuja niiden rinnalle. Geopolymeerit tarjoavat vertailukelpoista suorituskykyä betoniin verrattuna, mutta niiden suurin lisäetu on huomattavasti pienemmät kasvihuonepäästöt sekä se, että ne voidaan valmistaa teollisuuden sivuvirroista. Raaka-aineesta ja valmistusolosuhteista riippuen geopolymeereillä voi olla monenlaisia ominaisuuksia, kuten korkea puristuslujuus, alhainen kutistuminen, nopea tai hidas kovettumisaika, hyvä haponkestävyys, hyvä palonkestävyys ja matala lämmönjohtavuus. Epäorgaanisia polymeerejä ei kuitenkaan pidetä ”ihmelääkkeenä” perinteisten materiaalien korvaamiseen, vaan niille pyritään saavuttamaan halutut ominaisuudet ja vähentämään kustannuksia oikeanlaisien sekoitusten, reseptien ja prosessisuunnittelun avulla (Duxson et al. 2007).

Kuvassa 1 kuvataan geopolymersaation vaiheet (Duxson et al. 2007) ja kuvan yläpuolella on selitetty geopolymersaation tapahtumat vaiheittain (Yliniemi 2017).

1. **Liuottaminen:** Alumiinisilikaattiraaka-aineet liukenevat emäksisessä hydrolyysissä aluminaatti- ja silikaattiliryhmiksi.
2. **Kemiallisen tasapainon saavuttaminen:** Ylikylläisen alumiinisilikaattiliuoksen muodostuminen.
3. **Geelityminen:** Oligomeeriset ryhmät alkavat muodostamaan verkostoja.

4. **Uudelleenjärjestäytyminen ja kovettuminen:** Geeliverkon yhtenäisyys ja yhdistyneisyys kasvaa ja kolmiulotteinen rakenne alkaa muodostua.
5. **Polymerisaatio ja kovettuminen:** Lopullinen kovettumisvaiheen kesto voi vaihdella muutamasta tunneista useisiin viikkoihin riippuen käytetyistä raaka-aineista ja synteesin muuttujista (Yliniemi 2017).



Kuva 1. Geopolymerisaation vaiheet (Duxon et al. 2007).

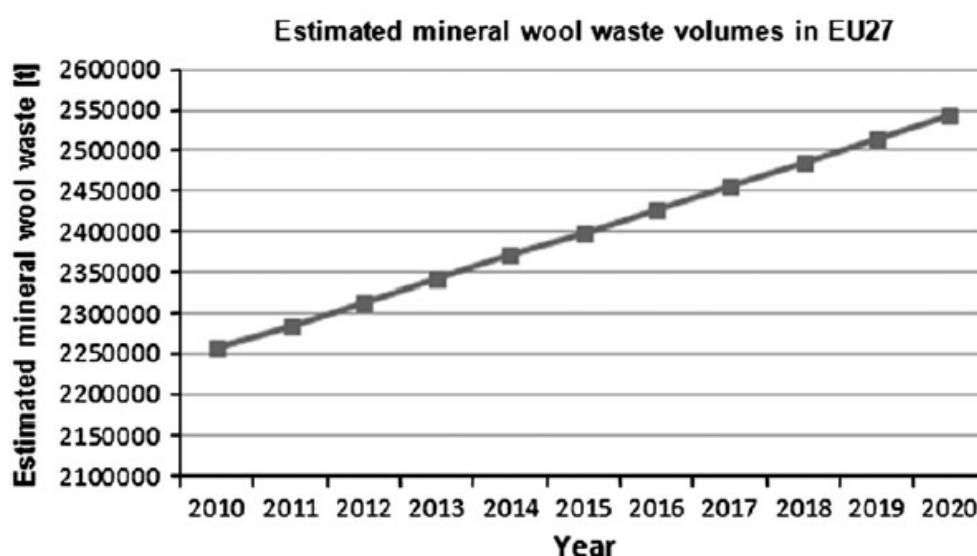
Geopolymeerien lähtöaineina käytetään useita raaka-aineita kuten kuonaa, tuhkaa ja kalsinoitua savea. Tuhka ja kuona ovat ympäristölle haitallisia teollisuusjätteitä eikä niille ole toistaiseksi juurikaan uusiokäyttöä, joten niitä on pyritty varta vasten käyttämään tutkittuina raaka-aineina. Ne soveltuvat hyvin geopolymeerien lähtöaineiksi niiden

kemiallisen koostumuksensa ansiosta, kuten myös mineraalivillat joita käytettiin tämän työn kokeiden mittauksissa (Hyypiö 2015).

2.2 Mineraalivillat ja niiden ominaisuudet

Mineraalivilla on yleinen termi, joka kattaa erilaisia epäorgaanisia eristemateriaaleja. Niitä käytetään eristemateriaaleina rakennuksissa maailmanlaajuisesti. Mineraalivillat jaotellaan kolmeen perusr ryhmään; lasivilloihin, kivivilloihin ja kuonavilloihin. Mineraalivillat ovat lämpö- ja äänieristeenä edullisia, helppokäyttöisiä, kevyitä ja tehokkaita. Matalan tiheyden ja kuitumaisen rakenteen vuoksi, niitä pidetään kuitenkin kierrätyskelvottomina, joten niiden uusio- ja hyötykäytön vuoksi ne ovat erittäin potentiaalisia tutkimuskohteita. Lasi- ja kivivilla ovat lupaavia geopolymeerien raaka-aineiksi niiden kemiallisen koostumuksen ja minerologian vuoksi (Yliniemi et al. 2016).

Tällä hetkellä ei ole taloudellista kannattavaa teknologiaa mineraalivillan kierrätykseen tai uudelleenkäyttöön. Euroopan unionissa syntyi noin 2,3 miljoonaa tonnia mineraalivillajätettä vuonna 2010 (kuva 2), ja suurin osa tästä päätyy kaatopaikoille. Määrän odotetaan kasvavan 2.5 miljoonaan tonniin vuoteen 2020 mennessä. (Väntsi, O. and Kärki, T. 2014).



Kuva 2. Arvioitu mineraalivillajätteen syntyminen EU-27 maissa (Väntsi, O. and Kärki, T. 2014).

2.2.1 Lasivilla

Lasivilla valmistetaan pääasiassa hiekasta, soodasta, kalkkikivestä ja kierrätyslasista. Sekoittamisen jälkeen ne kaadetaan uuniin missä ne sulatetaan yli 1400°C lämpötilassa. Tämän jälkeen seos pakotetaan pienten reikien läpi muodostaen kuidut. Kuituja ruiskutetaan sideaineella ja muotoillaan peitoksi. Tyypillinen sideaineen määrä lasivillassa on 6-11 %. Peitto kulkeutuu kuivausuunin lävitse, jolloin tämän prosessin aikana peite voidaan puristaa sen lopullisen paksuuden saavuttamiseksi. Lopuksi puristettu peitto leikataan halutulle leveydelle ja pakataan (ISOVER 2018).

2.2.2 Kivivilla

Kivivillaa on hyödynnetty teollisuudessa jo yli 80 vuoden ajan. Sitä voidaan kutsua luonnon omaksi keksinnöksi, sillä tulivuoren purkautuessa tuuli kuiduttaa kivilulan matoksi vuoren pinnalle. Siitä syntyvät kuidut ovat kivivillaa sen ensimmäisessä muodossa.

Kivivillaeristettäkin tuotetaan luonnonmukaisella tavalla. Emäksisiä kivilajeja kuten basalttia, dolomiittia, anortosiittia ja gabroa sulatetaan 1500°C lämpötilassa, jonka jälkeen kuidutetaan. Nämä kuidut saadaan pysymään paikoillaan lisäämällä valmistusprosessiin 2-4 % orgaanista sideainetta, joten kivilajien osuus kivivillan painosta on 96-98 %. Sideaineen ja pienen öljymäärän lisäämisen jälkeen kuitukokonaisuus saadaan muokattua haluttuun tiheyteen ja paksuuteen. Sideaineen kovettumisen jälkeen kivivillamatto leikataan haluttuun muotoon ja pakataan (PAROC 2018).

3 KOKEELLINEN OSA

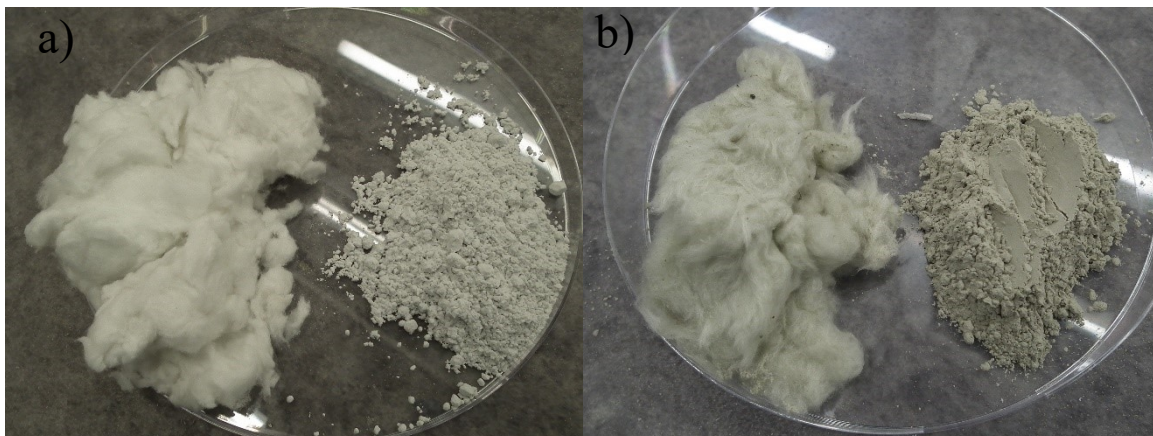
3.1 Materiaalit ja menetelmät

3.1.1 Materiaalit

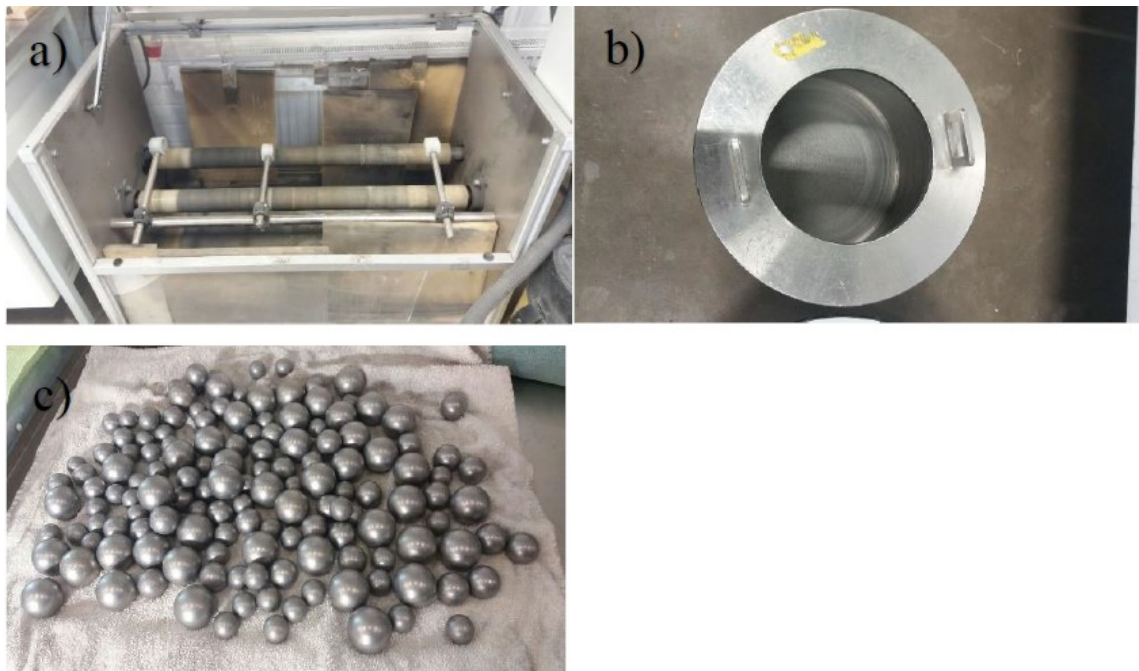
Kokeissa käytettiin tyypillistä kaupallista lasivillaa (Glass wool, GW) ja kivivillaa (Stone wool, SW), jotka eivät sisältäneet orgaanista sideainetta.

Kokeissa käytettiin neljää eri aktivaattoria; natriumhydroksidiliuosta (NaOH), natriumsilikaattiliuosta (Na-Sil), natriumaluminaatti liuosta (Na-Alu) sekä natriumkarbonaattiliuosta (Na_2CO_3).

Ennen varsinaisia kokeita lasi- ja kivivillat tarkastettiin että ne eivät sisältäneet mitään epäpuhtauksia. Villat pilkottiin ja leikattiin pienemmiksi palasiksi jonka jälkeen (kuva 3) jauhettiin Germatecin kuulamyyllyllä (kuva 4) jauheiksi.



Kuva 3. a) Lasivilla ennen jauhatusa (vasemmalla) ja jauhatuksen jälkeen (oikealla) ja b) kivivilla ennen jauhatusa (vasemmalla) ja jauhatuksen jälkeen (oikealla).



Kuva 4. a) Germatecin kuulamyllylaitteisto, b) 10 litran jauhatussylinteri ja c) jauhatuksessa käytetyt kuulat (Hirvijoki 2018).

3.1.2 Näytteiden valmistus

Mineraalivillojen jauhatuksen jälkeen ne alkaliaktivoitiin geopolymeereiksi. Näytteet valmistettiin sekoittamalla materiaalit taulukon 1 mukaisilla mineraalivillan ja aktivaattorin suhteilla.

Taulukko 1. Työssä käytettyjen seoksien reseptit.

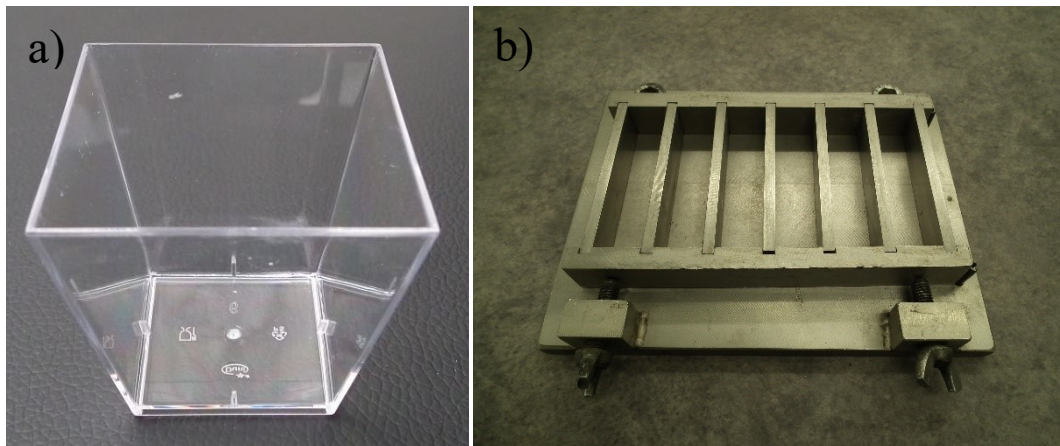
Seoksien reseptit	Glass wool (wt %)	Stone wool (wt %)	NaOH (wt %)	Na-Sil (wt %)	Na-Alu (wt %)	Na ₂ CO ₃ (wt %)
GD23+NaOH	67.4		32.6			
GD23+Na-Sil	59.0			41.0		
GD23+Na-Alu	63.9				36.1	
GD23+Na ₂ CO ₃	65.3					34.7
GD14+NaOH		67.4	32.6			

GD14+Na-Sil		59.0		41.0		
GD14+Na-Alu		63.9			36.1	
GD14+Na ₂ CO ₃		65.3				34.7

Lämpökaappi säädettiin 40 °C:een, jonka jälkeen valmistettiin 150 g geopolymerinäyte. Geopolymerinäytteeseen mitattiin valitsemamme aktivaattori sekoitusastiaan ja käynnistettiin sekoitus IKA-mixerillä (kuva 5) käyttäen 800 rpm sekoitusnopeutta. Jauhettu lasivilla tai kivivilla lisättiin liuokseen vähitellen kahden minuutin ajan. Yhteensä seosta sekoitettiin 5 minuuttia. Valmistuneesta seoksesta kaadettiin osa 40 mm korkeaan muovimuottiin (kuva 6) asettumisaika-mittauksia (setting time) varten ja osa kahteen 2 x 2 x 8 cm kokoiseen metallimuottiin (kuva 6) puristuslujuusmittauksia varten, jonka jälkeen muotteja tärisytettiin Vortexilla (kuva 5) 10 - 15 sekuntia ilmakuplien poistamiseksi. Metallimuotit suljettiin muovin sisään ja muovimuotit asetettiin kannella suljettuun astiaan, jonka jälkeen ne laitettiin kovettumaan lämpökaappiin.



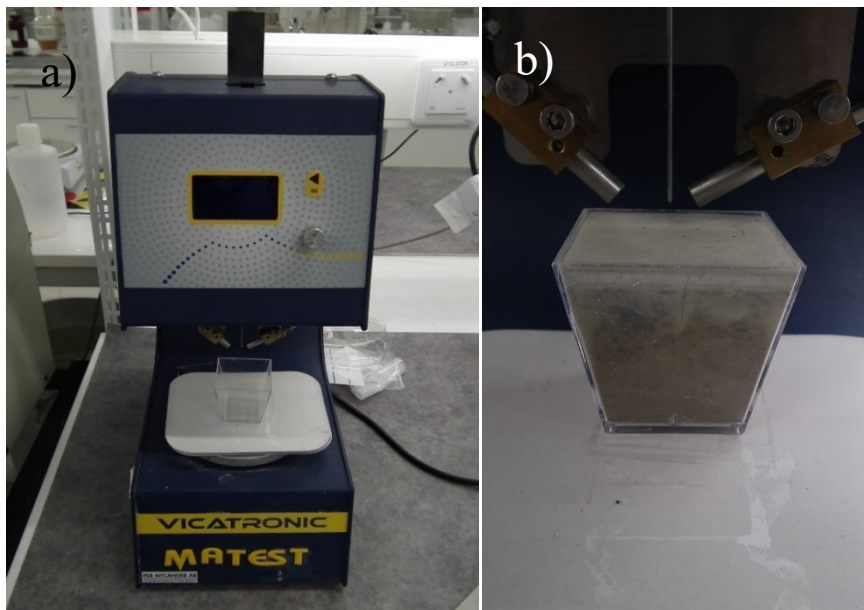
Kuva 5. a) Geopolymerinäytteen sekoittamiseen käytetty high shear IKA-mixer sekä b) valmistuneen näytteen ilmakuplien poistamiseen käytetty Vortex-Genie 2 täräytin.



Kuva 6. a) Setting time-mittauksissa käytetty muovimuotti sekä b) puristuslujuusmittauksissa käytetty metallimuotti.

3.1.3 Asettumisaika eli setting time-mittausmenetelmä

Asettumisaikaa mittaava Vicatronic-mittauslaite (kuva 7) kalibroitiin ja lämpökaapissa olevasta näytteestä (kuva 7) mitattiin ensimmäinen asettumisaika 50 minuuttia näytteen valmistumisen jälkeen. Tämän jälkeen mittaussykli oli 20 minuuttia, lukuun ottamatta tiettyjä näytteitä, joissa käytettiin pidempään mittaussykliä. Kunkin mittauksen jälkeen näyte laitettiin takaisin lämpökaappiin kovettumaan. Laitteen näyttäessä lukemaa 3 mm tai enemmän (neula ei läpäise koko näytettä kalibroidulle 0-tasolle), ”initial setting time” on saavutettu. Kun laitteen lukema on 37 mm tai enemmän, näytteen ”final setting time” on saavutettu.



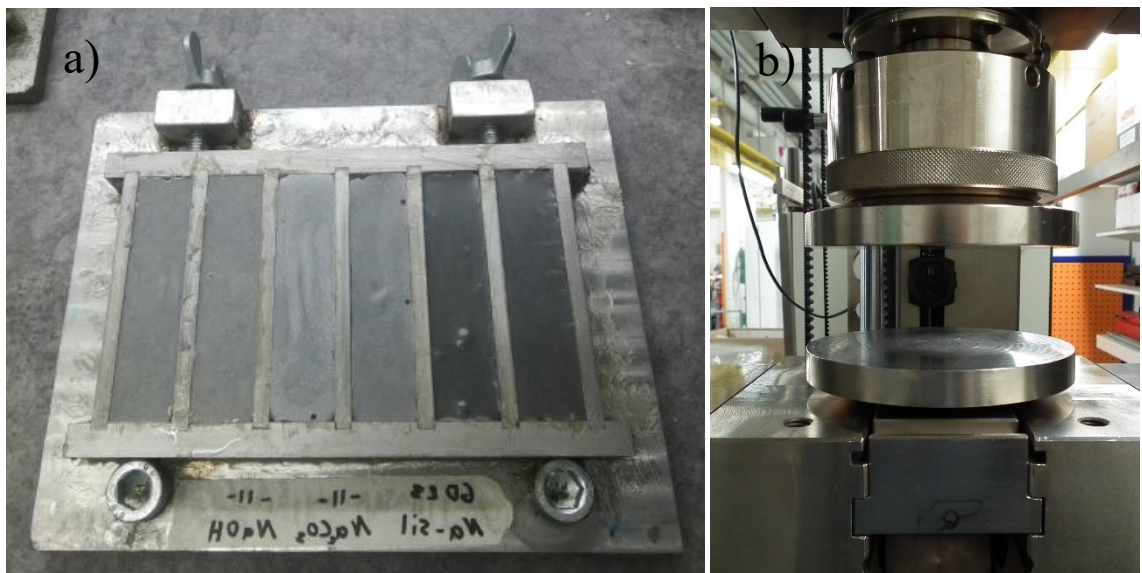
Kuva 7. a) Vicatronic asettumisaika-mittauslaite sekä b) kovettunut geopolymeerinäyte.

3.1.4 Puristuslujuusmittaus

Metallimuotit otettiin pois lämpökaapista (kuva 8) halutun lujittumisajan jälkeen (28vrk, 7 vrk, 3 vrk, 1 vrk). Prismanäytteet poistettiin muoteista varovasti ja laitettiin omiin minigrip-pusseihin.

Prismanäytteiden puristuslujuusmittaukset suoritettiin Zwick mechanical tester 100kN:llä (kuva 8). Prismanäytteille suoritettiin 1 - 2 mittausta per näyte. Osa 1 vrk näytteistä eivät olleet kovettuneet vielä tarpeeksi ja näytteistä ei saanut puristuslujuutta mitattua lainkaan.

Puristuslujuus laskettiin näytekappaleen pinnan puristettavan osan pinta-alan ja maksimipuristusvoiman avulla, jonka jälkeen muunnettiin newtoneista megapascaliksi (MPa). Puristuslujuuden (σ_c) kaava on: $\sigma_c = F / A$, jossa A on kappaleen puristettavan alueen pinta-ala (mm^2) ja F on maksimipuristusvoima (N).



Kuva 8. a) Lämpökaapista otettu metallinen geopolymeerimuotti sekä b) Zwick mechanical tester puristuslujuusmittauslaite

3.2 TULOKSET

Tämän tutkimuksen tulokset on esitetty kahdessa osassa, ensimmäisessä osassa esitetään valmistettujen geopolymeerinäytteiden asettumisaikojen tuloksia. Toisessa osassa esitetään valmistettujen geopolymeerinäytteiden puristuslujuustuloksia.

3.2.1 Asettumisaika

Eri reseptien asettumisajat ovat esitettynä Taulukossa 2.

Tulokset osoittavat, että kivivillasta valmistetut geopolymeerit saavuttavat sekä Initial Setting time-ajan että Final Setting time-ajan nopeammin kuin lasivillasta valmistetut, kun käytetään samaa aktivaattoria. Ainoastaan käytettäessä natriumkarbonaattiliuosta (Na_2CO_3) aktivaattorina, lasivillasta valmistetun geopolymeerin asettumisaika on nopeampi kuin kivivillasta valmistettu.

Molemmat jätemineraalivillat reagoivat ja kovettuvat eri tavalla eri aktivaattoreita käytettäessä. Työssä käytetyistä aktivaattoreista nopeimmat asettumisajat lasivillageopolymeereille määritettiin natriumsilikaatti- (Na-Sil) ja natriumkarbonaattiliuksilla (Na_2CO_3). Näillä aktivaattoreilla Final Setting time saavutettiin 5 - 6 tunnissa.

Kivivillageopolymeereille nopeimman asettumisajan tuottivat natriumhydroksidiliuos (NaOH) sekä natriumsilikaattiliuos (Na-Sil). Näillä aktivaattoreilla Final Setting time saavutettiin 3 - 4 tunnissa.

Tulokset osoittavat että natriumaluminaatti liuos (Na-Alu) aktivaattorina on selvästi hitain kovettumisen suhteen. Kivivillasta valmistetun geopolymeerin Final Setting time on 30 h ja lasivillasta valmistetun useita vuorokausia.

Taulukko 2. Työssä käytettyjen seoksien asettumisaikojen tulokset.

Näytteet	Intial Setting time	Final Setting time
GD23+NaOH	8 t	10 t 30 min

GD23+Na-Sil	4 t 10 min	5 t 20 min
GD23+Na-Alu	30 t – 47 t	> 47 t
GD23+Na ₂ CO ₃	4 t 30 min	6t 10 min
GD14+NaOH	2 t 15 min	3 t
GD14+Na-Sil	3 t 10 min	4 t 10 min
GD14+Na-Alu	8 t 10 min	11 t 50 min
GD14+Na ₂ CO ₃	28 t	30 t

3.2.2 Puristuslujuus

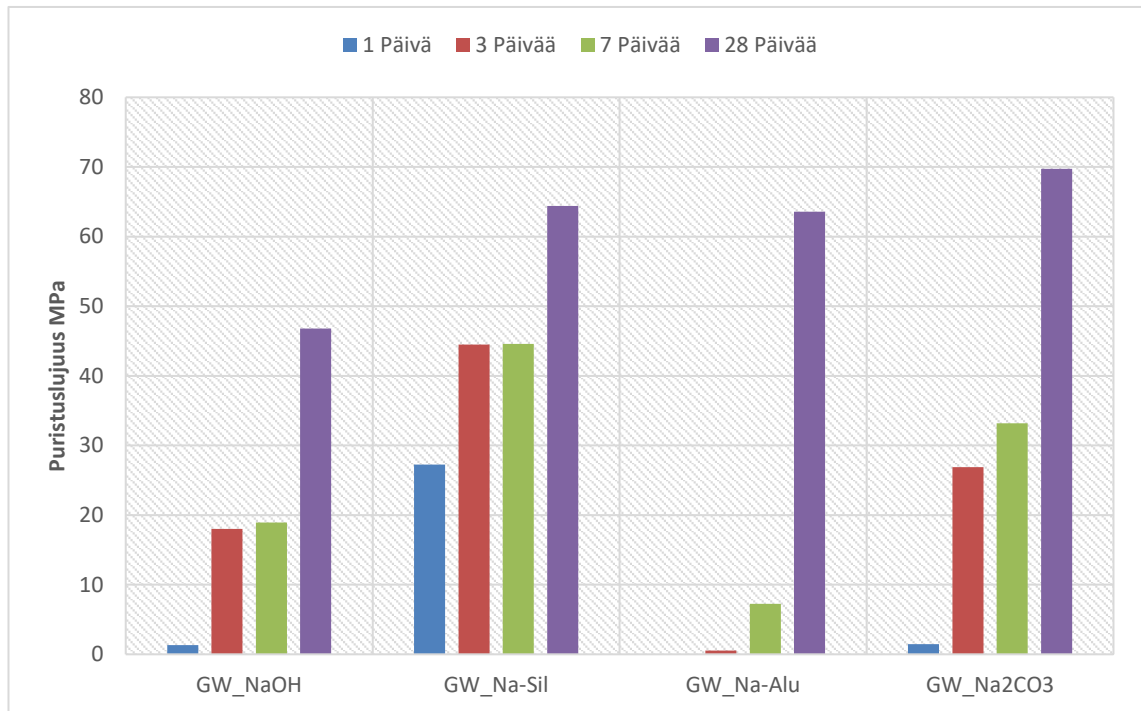
Eri reseptien puristuslujuusmittaukset ovat esitetty kuvissa 10 ja 11. Tulokset ovat jaoteltu lasivillasta, GW (kuva 10) ja kivivillasta, SW (kuva 11) valmistettuihin geopolymeereihin. Kuvaajissa on esitettynä näytteiden tulosten keskiarvot 1, 3, 7 ja 28 päivän mittausten kohdalla. Geopolymeerit kovettuvat vielä 28 päivän jälkeenkin, mutta työssä käytetään termiä ”loppulujuus” viitaten 28 päivän lujuuteen. On mahdollista, että geopolymeerien lujuudet kasvavat vielä kuukausien ja vuosien aikana.

Lasivillageopolymeereistä ainoastaan GW_Na-Sil kovettui erinomaisesti (27 MPa) jo yhden vuorokauden kovettumisajalla. Loppulujuudeksi se saavutti 64 MPa. Sen lujuuden kehitys on nopeaa sekä loppulujuus erinomainen.

Lasivillageopolymeeri GW_Na-Alu ei kovettunut vielä 3 tai 7 vuorokauden jälkeen merkittävästi (0,5 Mpa ja 7,2 Mpa), mutta loppulujuus oli 64 Mpa. Tämä osoittaa, että loppulujuus on erinomainen, mutta lujuuden kehitys on hidasta.

Kolmas erinomainen loppulujuustulos saatiin, kun lasivillageopolymeerin GW_Na₂CO₃ loppulujuus oli 70 MPa. Ainoastaan GW_NaOH loppulujuus 47 MPa jäi muista

lasivillageopolymeerien tuloksista. Vertailun vuoksi, tyypillisen rakennusbetonin puristuslujuus 28 päivän lujittumisen jälkeen on 45 MPa (FINNSEMENTTI 2019).

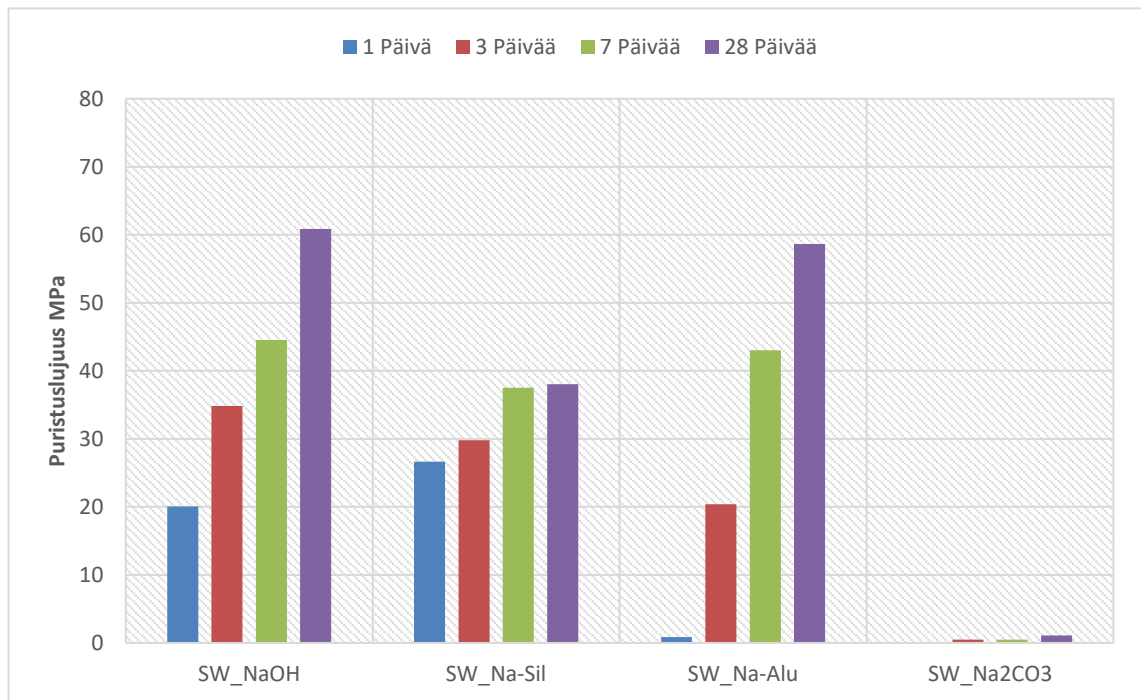


Kuva 10. Lasivillajätteestä valmistettujen geopolymeerien puristuslujuustuloksien keskiarvot kovettumisaajan mukaan.

Kivivillageopolymeereistä SW_NaOH sekä SW_Na-Sil kovettui erinomaisesti yhden vuorokauden kovettumisajalla (20 MPa ja 27 MPa). SW_Na-Sil kivivillageopolymeerin loppulujuus oli 38 MPa. Sen kovettuminen oli nopeaa, mutta lujuuden kehitys hidastuu merkittävästi 7 päivän kovettumisen jälkeen.

Hyvät loppulujuudet kivivillageopolymeereistä saavuttivat SW_NaOH sekä SW_Na-Alu loppulujuuksilla 61 MPa ja 59 MPa. Kuvaajan tuloksista voidaan huomata, että niiden kovettuminen ja lujuuden kehitys oli erittäin tasaista.

Huomioitavaa on, että kivivillageopolymeeri SW_Na2CO3 ei saanut vielä 28 vuorokauden kovettumisen jälkeen juuri minkäänlaisia puristuslujuustuloksia, sillä sen loppulujuus oli erittäin heikko 1 MPa.



Kuva 11. Kivivillajätteestä valmistettujen geopolymeerien puristuslujuustuloksien keskiarvot kovettumisajan mukaan.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mineraalivillan ja aktivaattorinesteen suhde määrittää seoksen juoksevuuden. Optimaalisen suhteen löytäminen vaatii aina testaamisen, sillä seoksen sekoittuvuus kärsii villan määrää lisättäessä ja muottiin valaminen vaikeutuu huomattavasti. Samalla ilmakuplien poisto täryyttämällä näytteistä pois vaikeutuu, joka on tärkeässä asemassa geopolymeerien kestävyyskannalta. Saman aktivaattorin kivivillajauheesta valmistettu seos oli huomattavasti juoksevampaa ja helpompi valaa muotteihin, kuin samalla reseptillä valmistettu lasivillageopolymeeri.

Kovettumisen aikana näytteillä voi tapahtua myös muodonmuutoksia, kuten epämuotoisuutta tai vääntymistä, etenkin jos näytteitä ei saa tärytettyä hyvin tai pidettyä muoteissa ja lämpökaapissa tarpeeksi pitkään. Esimerkiksi lasivillageopolymeerien pinta saattoi kaareutua jos se otettiin liian aikaisin asettumisaikamittaukseen jolloin mittauslaitteen neula painoi näytteen kalvomaista pintaa kaareutuvaksi.

Työhön valituissa resepteissä kaikkiin seoksiin käytettiin sama määrä valittua aktivaattoria sekä lisäksi lasi- ja kivivillajauhetta. Tulokset osoittavat, että samaa määrää lasi- ja kivivillaa käytettäessä lasivillageopolymeerien kovettuminen on hitaampaa, mutta niiden loppulujuudet ovat hyviä ja erinomaisia. Kivivillageopolymeereillä kovettuminen on nopeampaa ja tasaisempaa, mutta loppulujuudet jäävät lasivillageopolymeereistä.

On mahdollista, että kaikkein kovimpia geopolymeerejä saadaan valmistettua maksimoimalla jauhetun villan määrä suhteessa aktivaattorin määrään. Vaikka lasivillanäytteiden loppulujuudet olivat työssä parempia, olisi kivivillanäytteitä valmistaessa kivivillajauhetta voinut lisätä enemmän kuin mitä resepti sisälsi. Tällöin seos olisi ollut vielä tarpeeksi juoksevaa ja mahdollista valaa muotteihin. Oletettavasti niiden loppulujuudet olisivat olleet parempia kuin nykyiset tulokset, jopa parempia kuin lasivillageopolymeereillä.

5 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin lasi- ja kivivilla soveltuu geopolymeerien lähtöaineeksi. Koska mineraalivillajätteen uusiokäytölle ei ole toistaiseksi keksitty järkeviä käyttökohteita, päätyy nämä rakennus- ja purkujätteet kaatopaikalle niiden hankalan kierrätettävyyden vuoksi, jonka lisäksi ne aiheuttavat terveyshaittoja ja ovat ympäristölle haitallisia. Työssä tultiin siihen tulokseen, että mineraalivillajäte soveltuu erinomaisesti geopolymeerien lähtöaineeksi. Työssä valmistettiin erittäin lujia geopolymeerejä mineraalivillajätteestä osoittaen niiden olevan kilpailukykyisiä perinteisen betonin rinnalla. Tulevaisuudessa mineraalivillajätteestä voidaan mahdollisesti valmistaa rakennusmateriaaleja korvaamaan osan betonirakenteista ja valmistaa esimerkiksi huonekaluja ja takkoja. Geopolymeerien ominaisuudet riippuvat ns. reseptistä eli lähtöaineista ja erityisesti alkaliaktivaattorista, niiden suhteista sekä valmistusolosuhteista. Tässä työssä tutkittiin alkaliaktivaattorin vaikutusta asettumisaikaan ja puristuslujuuden kehitykseen.

Lopullinen asettumisaika lasivillageopolymeereille vaihteli 5 tunnista yli kahteen vuorokauteen ja kivivillageopolymeereille 3 – 30 tuntiin. Määritetyt lopulliset puristuslujuudet olivat pääsääntöisesti erittäin korkeita. Työssä saatiin valmistettua lujimmillaan noin 60 MPa puristuslujuuden kestäviä kivivillageopolymeerejä. Lasivillapohjaisille geopolymeereille mitattiin 47 - 70 MPa puristuslujuuksia. Vertailun vuoksi, tyyppillisen rakennusbetonin puristuslujuus 28 päivän lujittumisen jälkeen on 45 MPa (FINNSEMENTTI 2019).

Lujin yksittäinen puristuslujuustulos tässä kandidaatintyössä oli 82 MPa, joka mitattiin lasivillageopolymeeristä. Kivivillageopolymeerin lujin yksittäinen puristuslujuustulos oli 77 MPa.

6 LÄHDELUETTELO

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E. & Bahadori, A. 2013, "Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry", *Journal of Cleaner Production*, vol. 51, pp. 142-161.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. & Van Deventer, J.S.J, 2007. Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, **42**(9), pp. 2917-2933.

FINNSEMENTTI 2019. "Betonin lujuus". Verkkosivu, saatavilla: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/#top> [Viitattu 31.1.2019].

Hirvijoki, T. 2018. Mineraalivillajätteiden geopolymerosointi. Diplomityö, Oulun yliopisto, Faculty of Technology

Hyypiö, K. 2015. Lasi- ja Kivivillan käyttö geopolymeerien lähtöaineena. Kandidaatintyö, Oulun yliopisto, Faculty of Technology

ISOVER 2019. "GLASS WOOL". Verkkosivu, saatavilla: <https://www.isover.com/glass-wool> [Viitattu 15.1.2019].

Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., Illikainen, M. 2018, Cement and Concrete Research (2017), Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001> [Viitattu 31.1.2019].

PAROC 2019. "PAROC-kivivilla - luonnollinen kestävä eriste". Verkkosivu, saatavilla: <https://www.paroc.fi/miksi-kivivilla> [Viitattu 15.1.2019].

Väntsi, O. & Kärki, T. 2014, "Mineral wool waste in Europe: A review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, vol. 16, no. 1, pp. 62-72.

Yliniemi, J. 2017. ALKALI ACTIVATION-GRANULATION OF FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASHES. Väitöskirja, Oulun yliopisto, Faculty of Technology. ISBN: 978.952-62-1562-4. Saatavilla: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526215624.pdf> [Viitattu 14.1.2019].